

DESEMPENHO ELETROQUÍMICO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS INTEGRADOS A CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL MICROBIANAS OPERADOS EM FLUXO DE MARÉ NO TRATAMENTO DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO À BASE DE ÓLEO SOB DIFERENTES CONDIÇÕES SALINAS

Yara C. Gomes¹, Eder C.L. Coimbra², Alisson C. Borges²

¹Departamento de Química, UFV, Viçosa, Brasil (yara.gomes@ufv.br)

²Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, Brasil.

Resumo: Este estudo avaliou o tratamento de fluido de perfuração à base de olefina em sistemas alagados construídos integrados a células de combustível microbianas, sob salinidades de 0, 3 e 6 g L⁻¹. O experimento seguiu delineamento fatorial 3×3 com *Canna indica*, *Cenchrus setaceus* “Rubrum” e controle sem vegetação. Houve interação significativa entre salinidade e vegetação para tensão elétrica e pH ($p \leq 0,05$), indicando potencial do sistema em condições salinas.

Palavras-chave: Fluxo de maré; Água do mar sintética; *Canna indica*; *Cenchrus setaceus* “Rubrum”; Bioeletroquímica.

INTRODUÇÃO

Os fluidos de perfuração desempenham papel essencial na indústria de petróleo e gás, sendo utilizados para resfriamento e lubrificação da broca, estabilização das paredes do poço, transporte de cascalhos e controle de pressão durante as operações de perfuração. Entre os diferentes tipos disponíveis, os fluidos de perfuração à base de olefina têm recebido destaque devido ao elevado desempenho operacional, maior estabilidade térmica e menor toxicidade quando comparados aos fluidos convencionais à base de óleo mineral. Além disso, esses fluidos apresentam menor teor de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e reduzida toxicidade aguda, sendo frequentemente considerados alternativas ambientalmente mais adequadas para operações offshore e em ambientes ambientalmente sensíveis (Al-Shargabi et al., 2022; Njuguna et al., 2022).

Entretanto, apesar das vantagens operacionais e ambientais associadas ao uso desses fluidos, sua composição complexa representa um desafio significativo para os processos de tratamento. A presença de hidrocarbonetos hidrofóbicos, elevada carga orgânica, sais dissolvidos e diversos aditivos químicos dificulta os processos de biodegradação e reduz a eficiência de sistemas convencionais de tratamento biológico (Al-Shargabi et al., 2022; Njuguna et al., 2022). Compostos como NaCl e CaCl₂, frequentemente utilizados na formulação dos fluidos, aumentam a força iônica do meio e podem provocar estresse osmótico em microrganismos,

afetando negativamente a atividade metabólica e a degradação da matéria orgânica. Além disso, a natureza hidrofóbica da matriz oleosa reduz a biodisponibilidade do substrato para os microrganismos, favorecendo a formação de emulsões estáveis e aumentando a recalcitrância do efluente (Njuguna et al., 2022).

Outro aspecto relevante está relacionado ao aumento da geração de resíduos provenientes da exploração petrolífera, especialmente em atividades offshore, onde grandes volumes de fluidos de perfuração são utilizados diariamente. O descarte inadequado desses resíduos pode provocar impactos ambientais significativos, incluindo contaminação de corpos hídricos, toxicidade à biota aquática e acúmulo de compostos persistentes no ambiente. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e de baixo custo para o tratamento desses efluentes torna-se fundamental, especialmente em cenários onde a presença simultânea de salinidade e hidrocarbonetos dificulta a aplicação de tratamentos convencionais.

Diante disso, os sistemas alagados construídos têm sido amplamente investigados como alternativas sustentáveis para o tratamento de águas residuárias complexas, devido à integração de processos físicos, químicos e biológicos promovidos pela interação entre plantas, microrganismos e meio suporte (Vymazal, 2014). Esses sistemas apresentam vantagens como baixo consumo energético, facilidade operacional, reduzido custo de manutenção e elevada capacidade de adaptação a diferentes tipos de efluentes. Além disso, mecanismos como



sedimentação, filtração, adsorção, degradação microbiana e absorção vegetal contribuem simultaneamente para a remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos.

Os sistemas alagados construídos podem operar sob diferentes configurações hidráulicas (Geburu; Werkneh, 2024), sendo o fluxo de maré uma estratégia particularmente promissora devido à alternância entre ciclos de inundação e drenagem. Essa dinâmica favorece a transferência de oxigênio atmosférico para o leito, promovendo maior oxigenação do meio suporte e estimulando simultaneamente processos aeróbios, anóxicos e anaeróbios (Hu; Zhao; Rymszewicz, 2014). Como consequência, sistemas operados sob fluxo de maré tendem a apresentar maior eficiência na remoção de matéria orgânica e nutrientes quando comparados a sistemas de fluxo contínuo convencional. Além disso, a alternância hidráulica pode favorecer a redução de zonas de colmatção e melhorar a distribuição do afluente ao longo do leito.

Paralelamente, a integração de células de combustível microbianas aos sistemas alagados construídos tem despertado crescente interesse científico devido à possibilidade de associar tratamento de efluentes e geração de bioeletricidade em um único sistema. Nessas configurações bioeletroquímicas, microrganismos eletroativos oxidam a matéria orgânica presente no efluente e transferem elétrons para o ânodo, promovendo geração de corrente elétrica. Esse processo pode contribuir não apenas para o monitoramento bioeletroquímico do sistema, mas também para a recuperação parcial de energia a partir de resíduos orgânicos.

A eficiência dos sistemas integrados SAC–CCM depende diretamente de fatores como disponibilidade de substrato, condutividade elétrica do meio, estabilidade do biofilme eletroativo, configuração dos eletrodos e condições ambientais impostas ao sistema. Nesse contexto, a salinidade exerce papel ambíguo sobre o desempenho bioeletroquímico. Embora o aumento da força iônica possa favorecer o transporte de íons e reduzir a resistência interna do sistema, concentrações elevadas de sais também podem comprometer a atividade microbiana devido ao estresse osmótico e à alteração da estrutura da comunidade microbiana. Além disso, em matrizes oleosas, a salinidade pode intensificar o efeito salting-out, promovendo separação entre as fases óleo e água e reduzindo a biodisponibilidade do substrato orgânico para os microrganismos eletroativos.

Apesar dos avanços recentes envolvendo sistemas SAC–CCM, a maioria dos estudos ainda aborda a remoção de hidrocarbonetos totais de petróleo de

forma isolada, enquanto investigações que avaliam simultaneamente os efeitos da salinidade e de fluidos à base de olefina em sistemas operados sob fluxo de maré permanecem limitadas (Al-Baldawi et al., 2015; Mustapha; Van Bruggen; Lens, 2018; Wagner et al., 2021; Wu et al., 2025). Além disso, espécies vegetais como *Phragmites australis* e *Typha domingensis* são predominantemente utilizadas nesses sistemas, havendo menor número de estudos envolvendo *Canna indica* e *Cenchrus setaceus* “Rubrum” em condições salinas associadas à presença de fluidos olefinicos (Boonsaner; Borirukwisitsak; Boonsaner, 2011; Cui et al., 2024).

A escolha das espécies vegetais representa um fator importante no desempenho de sistemas alagados construídos, uma vez que características fisiológicas e morfológicas das plantas influenciam diretamente a oxigenação da rizosfera, o desenvolvimento do biofilme microbiano e a absorção de compostos potencialmente tóxicos. Espécies tolerantes à salinidade podem contribuir para maior estabilidade operacional dos sistemas, especialmente em efluentes com elevada concentração de sais dissolvidos.

Dessa forma, este estudo avaliou o desempenho de sistemas alagados construídos operados sob condições de fluxo de maré e integrados a células de combustível microbianas no tratamento de fluidos de perfuração à base de olefina sob diferentes níveis de salinidade e espécies vegetais, com ênfase na remoção de poluentes, na resposta bioeletroquímica e na geração de bioeletricidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram construídos nove sistemas alagados construídos utilizando colunas de PVC dispostas verticalmente, com 25 cm de diâmetro e 40 cm de altura. Os reatores foram preenchidos com camadas sucessivas de brita nº 1, carvão ativado granular e brita nº 0, organizadas de forma a favorecer a drenagem hidráulica, fornece suporte físico ao desenvolvimento vegetal e intensificar os processos de adsorção, retenção de sólidos e formação de biofilme microbiano. A utilização do carvão ativado granular teve como objetivo aumentar a área superficial disponível para colonização microbiana, além de favorecer a adsorção de compostos orgânicos hidrofóbicos presentes no fluido de perfuração. A disposição granulométrica do meio suporte também contribuiu para melhorar a distribuição do fluxo hidráulico e reduzir possíveis problemas de colmatção ao longo da operação.

Cada reator apresentou volume útil de 4,5 L e foi operado em regime de fluxo ascendente por meio de um tubo central perfurado responsável pela distribuição do afluente. Esse tipo de alimentação foi

adotado com o objetivo de favorecer maior contato entre o afluente, o meio suporte e a comunidade microbiana aderida ao leito, promovendo maior tempo de retenção e melhor aproveitamento dos processos físicos, químicos e biológicos envolvidos no tratamento.

Os sistemas foram operados sob condições de fluxo de maré em ciclos de 24 h, compostos por 16 h de fase alagada seguidas de 8 h de fase de repouso. Essa estratégia operacional foi adotada para promover oxigenação intermitente no leito, favorecendo simultaneamente processos aeróbios, anóxicos e anaeróbios ao longo do ciclo operacional. Durante a fase de drenagem e repouso, ocorre entrada passiva de oxigênio atmosférico nos poros do meio suporte, contribuindo para a renovação das condições redox do sistema e estimulando a atividade microbiana. Além disso, a alternância entre inundação e drenagem pode favorecer a redução de zonas de colmatção e melhorar a transferência de massa no interior do leito.

A inoculação microbiana foi realizada utilizando uma mistura de lodo anaeróbio e esgoto doméstico, visando introduzir uma comunidade microbiana diversificada e adaptável às condições operacionais impostas ao sistema. Após a inoculação, os sistemas permaneceram em período de aclimação por cinco semanas para estabilização da atividade microbiana e desenvolvimento do biofilme aderido ao meio suporte e aos eletrodos. Esse período foi considerado importante para favorecer a adaptação gradual dos microrganismos às condições salinas e à presença do fluido olefínico.

O delineamento experimental consistiu em um arranjo fatorial 3×3 , combinando três níveis de salinidade (0, 3 e 6 g L⁻¹ de água do mar sintética) e três condições de vegetação: controle sem vegetação (C), *Canna indica* (CI) e *Cenchrus setaceus* “Rubrum” (CT). A escolha das espécies vegetais foi baseada em sua capacidade de adaptação a ambientes alagados e potencial tolerância a condições salinas, além da influência que a rizosfera pode exercer sobre a atividade microbiana e os processos bioeletroquímicos do sistema.

O afluente sintético foi preparado utilizando água do mar sintética de acordo com Stefano et al. (1998), solução nutritiva de Hoagland com 25% da força iônica e fluido de perfuração à base de olefina disperso com surfactante Tween 80. A solução nutritiva foi utilizada para garantir disponibilidade mínima de nutrientes essenciais ao metabolismo microbiano e ao desenvolvimento vegetal durante a operação dos sistemas. A solução estoque contendo o fluido de perfuração foi inicialmente preparada na proporção de 1:8 (v/v) e posteriormente diluída para 1:100 (v/v) antes da aplicação nos sistemas. Essas

proporções foram definidas para garantir adequada emulsificação do fluido olefínico, minimizando simultaneamente a influência do surfactante sobre a demanda química de oxigênio e sobre os processos biológicos avaliados.

O fluido de perfuração utilizado nos experimentos era material virgem, conforme especificado em sua Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos. A utilização de fluido virgem permitiu maior controle experimental sobre a composição do afluente, evitando interferências associadas à presença de contaminantes externos ou alterações físico-químicas decorrentes do uso prévio do fluido em operações de perfuração.

As células de combustível microbianas foram integradas aos sistemas alagados construídos utilizando eletrodos de cobre como ânodo e eletrodos de fibra de carbono como cátodo, conectados por uma resistência externa de 1 k Ω . A escolha dos materiais buscou conciliar disponibilidade, condutividade elétrica e viabilidade operacional. Os eletrodos foram posicionados de forma a favorecer a transferência de elétrons gerados durante a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos eletroativos presentes no sistema.

O monitoramento de tensão elétrica e temperatura foi automatizado utilizando microcontroladores ESP32, sensores de temperatura DS18B20 e conversores analógico-digitais ADS1115. As medições foram registradas automaticamente a cada 30 minutos e armazenadas em cartão microSD para aquisição contínua e monitoramento dos dados. A automação do sistema de aquisição permitiu maior confiabilidade e resolução temporal das análises bioeletroquímicas realizadas ao longo da operação experimental, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

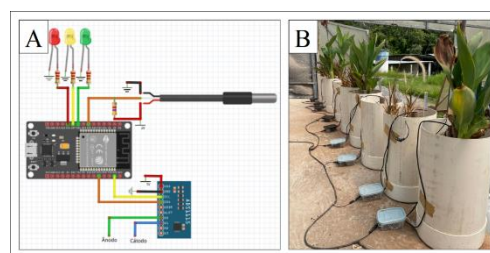


Figura 1. Voltage generation monitoring system in CWs: (A) electronic circuit schematic; (B) experimental setup of the reactors in operation.

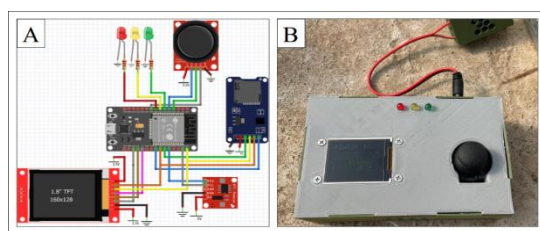


Figura 2. Voltage monitoring system in constructed wetlands (CWs): (A) electronic circuit schematic; (B) physical prototype of the implemented system.

A densidade de potência foi calculada de acordo com a Equação (1), considerando uma área superficial do ânodo de 0,00628 m².

$$Pd = \frac{U^2}{R \cdot A} \quad (1)$$

Onde Pd é a densidade de potência (mW m⁻²), j é a densidade de corrente (mA m⁻²), P é a potência (W), U é a tensão gerada (V), R é a resistência externa (Ω), A é a área superficial do ânodo (m²) e I é a corrente elétrica (A).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a distribuição dos valores de tensão elétrica (mV), representada por boxplots, sob as diferentes condições experimentais.

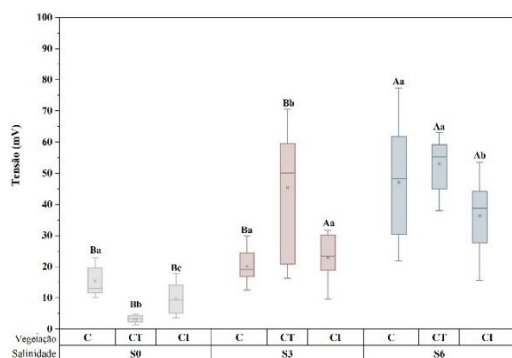


Figura 3. Tensão elétrica (mV) em sistemas alagados construídos integrados a células de combustível microbianas em função da salinidade e da vegetação.

Os dados de tensão elétrica (mV) apresentaram interação significativa entre salinidade e vegetação na ANOVA two-way ($p \leq 0,001$). Dessa forma, a interação foi posteriormente explorada por meio de ANOVA one-way. Nas condições S0, foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos ($C > CI > CT$). Em contraste, em S3, o tratamento CT apresentou maiores valores de tensão elétrica em comparação a C e CI, os quais não diferiram estatisticamente entre si. Em S6, os tratamentos C e CT não diferiram entre si, porém ambos apresentaram valores de tensão

significativamente superiores ao tratamento CI, conforme apresentado na Figura 3.

Nas condições S0, a maior tensão elétrica foi observada no sistema sem vegetação (C). Esse comportamento sugere que a presença de vegetação pode ter aumentado a liberação de oxigênio na rizosfera, introduzindo aceptores de elétrons concorrentes e desestabilizando a região anódica. Nesse sentido, Liu et al. (2020) relataram que a liberação de oxigênio pelas raízes pode comprometer as condições ideais do ânodo, reduzindo a eficiência eletrogênica. Além disso, a maior disponibilidade de oxigênio próximo à região radicular pode ter favorecido processos respiratórios aeróbios em detrimento da transferência extracelular de elétrons para o ânodo, reduzindo a atividade de bactérias eletrogênicas estritamente anaeróbias.

Em S3, os maiores valores de tensão elétrica foram observados em CT, indicando possíveis efeitos sinérgicos entre vegetação e salinidade moderada. Nessas condições, a maior condutividade iônica pode ter favorecido o transporte de íons e reduzido a resistência interna do sistema. Castellano-Hinojosa et al. (2025) relataram aumento da geração de tensão elétrica (até 800 mV) em sistemas CCM sob salinidade de 3,5 g L⁻¹ de NaCl, associado à maior abundância de microrganismos eletroativos. O aumento da força iônica do meio também pode favorecer a mobilidade de prótons e outros íons responsáveis pelo fechamento do circuito eletroquímico, reduzindo perdas energéticas associadas à resistência ôhmica do sistema.

Além disso, por se tratar de uma gramínea, CT tende a apresentar maior diversidade microbiana na rizosfera em comparação a outras espécies vegetais, o que pode influenciar diretamente a comunidade microbiana presente no ânodo (Saeed et al., 2023; Souza, 2023). Uma maior diversidade de bactérias eletrogênicas favorece a atividade metabólica e a oxidação do substrato, aumentando consequentemente a geração de corrente elétrica em sistemas CCM (Xu et al., 2024). A arquitetura radicular mais densa e fibrosa característica de gramíneas também pode aumentar a área de interação entre raízes, biofilme e substrato, favorecendo a colonização microbiana e a formação de microambientes redox distintos no leito do sistema.

Esse comportamento está de acordo com os resultados reportados por Chiranjeevi, Mohanakrishna e Venkata Mohan (2012), que observaram aumento da geração de tensão elétrica em sistemas CCM utilizando CT. Os autores destacaram que a produção de bioeletricidade está fortemente associada à disponibilidade de exsudatos radiculares, uma vez que a rizodeposição desempenha papel fundamental na transferência de



elétrons para o ânodo e, consequentemente, no aumento do potencial do sistema. Compostos liberados pelas raízes, como açúcares, aminoácidos e ácidos orgânicos, podem atuar como substratos prontamente biodegradáveis para os microrganismos eletroativos, intensificando os processos metabólicos associados à geração de corrente elétrica.

Em relação à densidade de potência (mW m^{-2}), os valores médios obtidos para SOC, SOCI, SOCT, S3C, S3CI, S3CT, S6C, S6CI e S6CT foram de 0,04; 0,02; 0,002; 0,07; 0,09; 0,3; 0,4; 0,2; e 0,5, respectivamente. Embora tenha sido observado aumento associado à salinidade, tanto a tensão elétrica quanto a densidade de potência permaneceram relativamente baixas, especialmente sob condições salinas. Esse comportamento demonstra que, apesar do aumento da condutividade elétrica promovido pelos sais dissolvidos, outros fatores limitaram o desempenho eletrogênico do sistema.

Xu et al. (2019) relataram valores de tensão elétrica de 389,06 mV e densidade de potência de $16,4 \text{ mW m}^{-2}$ em sistemas SAC-CCM vegetados tratando água residuária sintética salina com salinidade de 5 g L^{-1} . Em comparação, sob salinidade de 1 g L^{-1} , foram obtidos valores de 273 mV e $3,9 \text{ mW m}^{-2}$. Esses resultados sugerem que a salinidade pode favorecer a geração de eletricidade devido ao aumento da condutividade iônica. Entretanto, os valores obtidos no presente estudo foram inferiores aos reportados na literatura, mesmo sob condições salinas. Essa diferença pode estar relacionada às características específicas do afluente utilizado neste estudo, especialmente à presença de compostos hidrofóbicos e emulsificados provenientes do fluido de perfuração à base de olefina.

A menor tensão elétrica e densidade de potência observadas podem estar associadas à presença de uma matriz oleosa no afluente. Devido à natureza hidrofóbica do fluido à base de olefina, o acesso microbiano aos substratos pode ter sido limitado. Além disso, sob condições salinas, o efeito salting-out tende a intensificar a separação entre as fases óleo e água, reduzindo o contato entre o biofilme eletroativo e o substrato presente no ânodo (Grenoble; Trabelsi, 2018; Kundu et al., 2013). Esse fenômeno pode favorecer a formação de agregados oleosos e o acúmulo de compostos lipídicos sobre a superfície dos eletrodos, criando barreiras físicas para a transferência de massa e elétrons.

Sim et al. (2026) demonstraram que o uso de biossurfactantes é fundamental para manter a emulsificação e a biodisponibilidade em efluentes ricos em óleo, melhorando o desempenho eletrogênico. Em contrapartida, a ausência desses compostos pode provocar redução na geração de

eletricidade, além do acúmulo visível de lipídios sobre os eletrodos. A presença de biossurfactantes pode reduzir a tensão superficial e aumentar a área de contato entre os microrganismos e a fase oleosa, favorecendo processos de biodegradação e transferência eletrônica.

Assim, a produção de tensão elétrica observada neste estudo pode indicar a ocorrência de coalescência da emulsão óleo-água, especialmente sob condições S3 e S6, associada ao efeito da salinidade sobre a estabilidade da emulsão. Esse comportamento provavelmente limitou os processos de oxidação microbiana e transferência de elétrons. Além disso, a elevada concentração de sais pode ter promovido estresse osmótico em parte da comunidade microbiana, reduzindo a atividade metabólica de microrganismos não halotolerantes e afetando o equilíbrio ecológico do biofilme eletroativo.

Pasternak (2023) reportou correlação positiva entre geração de potência e redução da tensão superficial, sugerindo que a produção de biossurfactantes pode ser estimulada por microrganismos eletroativos em matrizes oleosas. Entretanto, emulsificação inicial insuficiente pode atuar como barreira física, impedindo o acesso microbiano à fase oleosa e reduzindo a eficiência da degradação e da transferência de elétrons. Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que a eficiência bioeletroquímica em sistemas tratando fluidos de perfuração olefinicos depende não apenas da condutividade iônica do meio, mas também da estabilidade da emulsão, da biodisponibilidade do substrato orgânico e da adaptação da comunidade microbiana às condições salinas e oleosas impostas ao sistema.

CONCLUSÃO

A integração de células de combustível microbianas aos sistemas alagados construídos possibilitou a geração de bioeletricidade a partir da matéria orgânica presente na matriz oleosa do fluido de perfuração, evidenciando o potencial bioeletroquímico do sistema mesmo sob condições salinas. Entretanto, os valores de tensão elétrica obtidos permaneceram relativamente baixos, indicando possíveis limitações relacionadas à biodisponibilidade do substrato e às condições operacionais do sistema.

A ANOVA two-way revelou interação significativa entre salinidade e vegetação para os parâmetros tensão elétrica (mV) e pH, demonstrando que a salinidade influenciou simultaneamente o equilíbrio ácido-base e a resposta bioeletroquímica dos sistemas. Esse comportamento sugere que alterações na força iônica do meio podem afetar tanto a



atividade microbiana quanto os mecanismos de transferência de elétrons no ânodo.

Além disso, a presença de vegetação parece ter exercido influência sobre a dinâmica eletroquímica dos sistemas, provavelmente em função da liberação de oxigênio e exsudatos radiculares na rizosfera. Sob determinadas condições, a maior disponibilidade de íons pode ter favorecido a condutividade elétrica e reduzido a resistência interna do sistema, enquanto a natureza hidrofóbica do fluido olefinico pode ter limitado o contato entre os microrganismos eletroativos e o substrato orgânico.

Dessa forma, os resultados demonstram que sistemas alagados construídos integrados a células de combustível microbianas apresentam potencial para o tratamento de fluidos de perfuração à base de olefina, mesmo em condições salinas, associando remoção de poluentes e geração de bioeletricidade em um único sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa (UFV), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e à Petrobras pelo apoio concedido.

REFERÊNCIAS

- Castellano-Hinojosa, A. et al. 2025. Salinity effects on microbial fuel cells performance. *Science of the Total Environment*.
- Chiranjeevi, P., Mohanakrishna, G., Venkata Mohan, S. 2012. Bioelectricity generation in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*.
- Grenoble, Z., Trabelsi, S. 2018. Salting-out effect in oil-water systems. *Colloids and Surfaces A*.
- Kundu, P. et al. 2013. Oil-water separation under saline conditions. *Langmuir*.
- Liu, X. et al. 2020. Effects of plant oxygen release on microbial fuel cells. *Bioresource Technology*.
- Pasternak, G. 2023. Surface tension reduction and power generation in microbial systems.
- Saeed, T. et al. 2023. Microbial diversity in rhizosphere of constructed wetlands. *Ecological Engineering*.
- Sim et al. 2026. Biosurfactants in microbial fuel cells.
- Xu, S. et al. 2019. Constructed wetland-microbial fuel cell treating saline wastewater. *Bioresource Technology*.
- Xu, Y. et al. 2024. Electrogenic bacteria and current generation in microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*.